

고강도 콘크리트

신 성 우

한양대학교 건축공학과 조교수

1. 배 경

1.1 고강도 콘크리트의 시대적 요청

콘크리트가 인간생활과 밀접한 관계를 가진 이후 그의 품질을 개선하기 위한 노력의 일환으로 보다 강하고(higher strength), 보다 가볍고(higher weight), 그리고 보다 질긴(higher toughness) 콘크리트의 연구에 집중적인 노력을 기울여왔다.

콘크리트의 강도 분야에서도 근세기에 이르러 이러한 노력의 결과로 세계 1차대전 당시의 구조물에 사용한 콘크리트의 압축강도가 일반적으로 $140\text{kg}/\text{cm}^2$ 였던 것이 진동기, 시멘트, 인공골재와 Transit Mixer의 개발에 따른 상업용 콘크리트의 활발한 기여에 의해 세계 2차대전 경에는 $280\sim 350\text{kg}/\text{cm}^2$ 까지의 콘크리트를 사용하게 되었다.

근래에는 도시건축의 초고층화, 심층 지하구조물, 거대한 해양구조물, 장시간 교량, 원자력 발전소 등 특수 구조물의 출현으로, 일부 선진 외국에서는 그에 부합되는 품질개선으로 고강도화가 급속히 이루어져 왔으며, 그중 미국에서는 $1330\text{kg}/\text{cm}^2$ 까지의 압축강도를 사용하고 있다.

이러한 선진 외국에서의 활발한 발전에 비교하여 볼때 국내에서는 아직도 그들의 30~40년 전의 품질인 $210\sim 300\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 압축강도를 사용하고 있는 실정이다. 따라서 앞으로의

콘크리트 산업의 발전과 국제경쟁력의 제고 그리고 다른 재료에 대한 우월성을 확보하기 위하여는 기존 법령 정비 및 산·학·연의 긴밀한 협조 그리고 연구분야의 과감하고도 지속적인 투자가 있어야 할 것이다. 이는 일부 선진국에서의 제조 및 시공기술이 각 제조회사의 기밀로 되어있고 그 기술도입에 많은 자금이 필요할 뿐만 아니라 기술이 도입된다 하더라도 국내의 시멘트, 골재, 혼화재 등의 품질이 외국제품과 일부 차이가 있으므로 그 기술 활용여부가 문제가 될 수 있기 때문이다. 이에 국내실정에 맞는 콘크리트 제조 및 역학적인 연구 그리고 그의 시공성의 확보를 위한 연구가 절실하다.

국내에서도 지금까지 일부 대학과 연구소에서 고강도 콘크리트 제조에 대한 연구를 하고 있으나 미국에서나 일본에서와 같은 표준 제조방법이 아직 정해져 있지 않고 있다. 더욱이 실험실에서 소정의 강도를 얻는다 하더라도 현장에서의 여건과 다르고 또한 그의 실제 적용은 고강도의 시공이 일반강도의 그것과 매우 달라 이에 대한 연구가 시급히 정리되어야 할 시점에 와 있다.

1.2 고강도 콘크리트

(1) 강도상의 정의

고강도 콘크리트(High Strength Concrete)는 보통강도의 콘크리트에 비하여 압축강도가 대

폭적으로 개선된 콘크리트를 말하는데 이의 구체적 의미는 국가나 지역에 따라 다르며, 콘크리트를 사용하는 기술자나, 제품생산에 따라 달라질 수 있기 때문에 상대적 개념으로 간주될 수 있다.

현재 고강도 콘크리트를 가장 많이 쓰고 있는 미국에서, 1950년대에는 $350\text{kg}/\text{cm}^3$ 이상이면 고강도로 간주되었으며, 아직도 미주지역의 일부에서는 이정도이면 물리적이거나 심리적인 한계로 여겨지고 있다. 이후 1960년대에는 $420\text{kg}/\text{cm}^3$ 에서 $520\text{kg}/\text{cm}^3$ 정도가, 그리고 1970년대 초에는 시카고 지역을 중심으로 $630\text{kg}/\text{cm}^3$ 의 고강도가 사용되었으며 1980년대에는 $1050\text{kg}/\text{cm}^3$ 가 시카고 지역에¹⁾, 그리고 $1330\text{kg}/\text{cm}^3$ 의 강도가 시애틀 지역²⁾에 사용되었다.

이에 미국 콘크리트 학회 고강도 콘크리트 분과위원회(Committee 363)는 1984년 보고서(1)을 통하여 그의 제조 및 시공에 관한 주의 사항과 함께 보통 중량 콘크리트(Normal Weight Concrete)는 $420\text{kg}/\text{cm}^3$, 그리고 경량 콘크리트(Light Weight Concrete)는 $280\text{kg}/\text{cm}^3$ 이상을 고강도로 정의하고 있다.

이웃 일본에는 1975년 이후 유동성에 중점을 둔 콘크리트의 시공성 향상을 통한 품질개선을 위주로 연구를 하여 왔으나 1981년에 “고강도 콘크리트조 설계 및 시공지침”이 발표된 이후 근래에는 고층 아파트 등(30~40층)에 적층공법과 함께 매우 활발히 사용되고 있으며 $360\sim 480\text{kg}/\text{cm}^3$ 정도의 고강도 콘크리트가 많이 이용되고 있어, $360\text{kg}/\text{cm}^3$ 이상이면 고강도로 간주되고 있다.

국내에서는 건설부 시행령³⁾에 따라 보통 중량 콘크리트는 $270\text{kg}/\text{cm}^3$ 이상의 콘크리트를, 그리고 경량 콘크리트는 $240\text{kg}/\text{cm}^3$ 이상을 고강도 콘크리트로 분류되고 있으나, 이는 1985년에 제정된 지방서일 뿐만 아니라 KS에서 프리스트레스트 콘크리트에 대하여 $400\sim 500\text{kg}/\text{cm}^3$ 의 강도를 요구하고 있는 점에 비추어 볼 때 국내에서도 고강도 콘크리트의 정의가 달

라져야 함을 알 수 있다. 필자 개인의 의견으로는, 국내에서의 현황과 세계의 추세로 보아 대개 $420\text{kg}/\text{cm}^3$ 이상의 콘크리트를 고강도로 보아야 무방할 것 같다.

(2) 제조방법상의 정의

고강도 콘크리트를 제조하기 위해서는 진동수가 높은 진동기를 사용한 진동다짐, 압력다짐 등의 방법과 시멘트 Matrix와 골재사이의 부착력을 높이기 위하여 시멘트 골재 등을 사용하거나, 공극을 메우기 위한 미세분말 침투 방법(Impregnated Method), 고온-고압 양생 방법(Auto Clave법)이나 고강도 강선을 감는 방법 등 여러방법이 있으나, 미국 ACI 고강도 콘크리트 분과위원회(1)에서는 특별한 재료나 양생방법을 사용하지 않고 재래식 재료에 배합비 및 재료의 적절한 선택과 고성능 감수제를 첨가하는 일반적인 방법으로 한정하고 있다. 이는 그의 제조가 경제성이 있어야 될 뿐만 아니라 재료의 조달방법과 시공상의 어려움등도 고려되어야 하기 때문인 것으로 보이며 국내에서도 ACI제조지침을 근간으로 하는 것이 무난한 것으로 보인다.

2. 고강도 콘크리트의 이점

고강도 콘크리트의 사용은 높은 압축강도 때문에 부재의 단면의 축소와 더불어 자중이 감소되는 부차적 효과이외에, 낮은 물-시멘트비에 따른 고성능 감수제(고유동화제)의 사용으로 시공성 향상이라는 다른 중요한 용도가 있으며, 이는 시공능률의 향상, 진동의 감소, 노무량 감소, 공기의 단축으로 나타내어지며 실제 구체적 응용내용은 다음과 같다.

- 철근이 집결되어 있거나 진동이 곤란한 부분-유동화 콘크리트 사용으로 진동기 사용이 감소되며, 진동기를 위한 거푸집의 개구부를 막을 수 있다.

- 바닥 슬래브, 지붕 슬래브, 간막이 벽과

같은 부재-진동기를 사용하지 않고도 고능률의 콘크리트 타설이 가능하다.

- 높은 부분(초고층 건물)까지 고압에 의해 콘크리트를 펌프 압송하는 경우

- 균일하고 수밀한 끝마감 콘크리트를 사용할 경우-슬라브, 벽체 등.

- 벽체, 기둥, 보, P.C.부재-보다 빠른 시공 이외에도 얇은 벽판, 많은 철근이 있는 단면에 효과적임.

이외에도 아파트 벽체, 지하실 연속벽 등에 사용할 경우 30~90%의 임금절약을 할 수 있는데 이는 역시 정확한 강도의 보장 뿐 만 아니라 인력, 설비에 대한 낮은 요구와 시공이 보다 빨리 진행되기 때문이다.

또한 건조수축과 크리프율이 주로 콘크리트의 경화초기에 발생하므로 이러한 조기경화 현상은 P.S.부재의 프리스트레스손실을 초기강도 증진으로 막아 줌으로 효과적인 대응방법이 될 수 있다.

3. 고강도 콘크리트의 적용현황

3.1 건축물에서의 고강도 콘크리트

고강도 콘크리트의 실용화 초기단계에서는 적용범위로 Consistency의 조정과 시공성의 증진을 위하여 주로 사용되었으나 그후 단위수량의 감소, 즉 물-시멘트비의 감소에 따른 고품질, 고강도 콘크리트를 제조하는 데까지 확장되어 근래에 특히 북미지역에 많이 쓰여지고 있다. 각 지역별 주요 건축물에서의 응용실태는 다음과 같다.

3.1.1 해외 현황

(1) 북미지역-이 지역에서의 고강도 콘크리트는 주로 고층건물에서 압축을 받는 부재에 많이 쓰여지고 있는데 이는 주어진 하중을 지탱하기 위하여, 압축강도의 증가가 가장 효과적이며, 이때 가능한한 최소철근을 사용함으

로써 가장 경제적인 건축물이 될 수 있기 때문이다. 북미지역의 고강도 콘크리트는 주로 시카고 지역을 중심으로 발전하여 왔는데 현재까지 이 지역에 사용된 가장 높은 압축강도는 1986년에 완공된 Michigan Annex 건물에서 $770\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 고강도를, 그리고 2개의 실험기둥에 $980\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 초고강도를 사용한 경우이다. 이외에도 시카고 지역에는 세계에서 가장 높은 콘크리트 건물인 Water Tower Place($630\text{kg}/\text{cm}^2$)이외에도 $420\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상의 고강도를 사용한 건물이 20여개에 달하고 있다. 최근 1987년에는 시애틀지역 Union빌딩에서 $1330\text{kg}/\text{cm}^2$ 까지의 강도가 사용된 실적이 있다.²⁾

이들은 보통강도 콘크리트의 2~3배의 압축강도를 사용하고 있어 초고층 건물이 이러한 고강도 콘크리트없이 불가능했음을 잘 보여주고 있다. 북미지역에서의 적용 예는 <표 1>에 자세히 나타나 있다.

<표 1>에서 Lake Point Tower는 1968년에 시카고 지역에 세워졌는데 층수가 70층(197m)으로 하부 기둥에 $525\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 압축강도를 사용하였다. 이는 그 당시에 가장 고강도를 사용한 건물이었으며 역시 가장 높은 콘크리트 건물이었다.

텍사스주 휴스턴에는 1970년에 One Shell Plaza가 완공되었는데 고강도 경량 콘크리트가 기둥과 슬라브에 사용되었다. 이 건물은 원래 35층으로 계획되었으나 후에 52층 건물로 건축되었다. 그러나 변경후에 35층의 단위경비(Unit Cost)로도 고강도 콘크리트($420\text{kg}/\text{cm}^2$)를 사용하여 52층 건물을 세울 수 있었다.

텍사스주 달라스에는 1983년에 Interface Plaza에 $700\text{kg}/\text{cm}^2$ 강도의 고강도 콘크리트를 기둥에 사용하였다. 이 경우는 단위경비당 최대의 강성(Stiffness)을 생산할 목적으로 고강도 콘크리트를 사용하여 철골에 비하여 단위경비당 6배의 강성을 가진 건물을 세울 수 있었다.

(2) 유럽지역-유럽지역중 서독에서는 고층

표 1.

고강도 콘크리트를 사용한 건축물

Building	Location	Year*	No. of storeys	Maximum design strength	
				lbf/in ²	MPa
One Shell Plaza	Houston	1968	52	6000L	41L
Pacific Park Plaza	Emeryville, CA	1983	30	6500	45
SE Financial Center	Miami	1982	53	7000	48
Petrocanada Buiding	Calgary	1982	34	7250	50
Lake Point Tower	Chicago	1965	70	7500	52
1130 S. Michigan Ave.	Chicago			7500	52
Texas Commerce Tower	Houston	1981	75	7500	52
Helmsley Palacc Hotel	New York	1978	53	8000	55
Trump Tower	New York		68	8000	55
City Center Project	Minncapolis	1981	52	8000	55
Larimer Place Condominiums	Denver	1980	31	8000	55
499 Park Avenue.	New York		27	8500	59
Royal Bank Plaza	Toronto	1975	43	8800	61
Richmond-- Adelaide Centree	Toronto	1978	33	8800	61
Midcontinental Plaza	Chicago	1972	50	9000	62
Frontier Towers	Chicago	1973	55	9000	62
Water Tower Place	Chicago	1975	79	9000	62
River Place	Chicago	1976	56	9000+	62+
Chicago Mercantile Exchange	Chicago	1982	40	9000++	62++
Columbia Center	Seattle	1983	76	9500	66
Interfirst Plaza	Dallas	1983	72	10000	69
900 N. Michigan Annex	Chicago	1986	15	14000	97

* Year in which high strength concrete was cast

+ Two experimental columns of 11000lbf/in²(76MPa) strength were included

++ Two experimental columns of 11000lbf/in² (97 MPa) strength were included

건물에 유동화 콘크리트를 사용하여 슬라브 콘크리트 타설을 하거나 원자력발전소 등에 500kg/cm²의 압축강도 콘크리트를 사용한 실적이 있다. 영국에서는 역시 서독과 같이 유동화 콘크리트가 주로 사용되고 있어 바닥이나 거대한 기초등에 현장타설 콘크리트의 40% 정도는 프리캐스트 분야에 사용되고 있는데, 특히 세계에서 최대 석유 Platform인 니니안 석유Platform에는 22개의 P.C.단위체가 모두 고강도와 우수한 내구성 및 시공성의 필요성에 의해 사용되었다. 이때 물-시멘트비는 30%, 슬럼프값 20cm, 그리고 Melamine계의 고성능 감수제를 사용하였다.

(3) 일본-이웃 일본에서도 초기에는 고강도의 목적보다는 유동성과 개선을 위한 목적으로 고성능 감수제등이 사용되어 왔으나 근래 4~5년 전부터 고층아파트(30~40층)에 360~450kg/cm²의 압축강도를, 그리고 최근에는 신교 NH빌딩의 기둥과보의 집합부와 슬래브의 일부에 600kg/cm²의 고강도 콘크리트를 다이세이(大成)건설에서 사용하여 앞으로 초고층 건물(55층 이상)에 RC조의 사용이 가까와지고 있음을 알 수 있다.

3.1.2 국내 현황

국내에는 420kg/cm²이상의 고강도 콘크리트

를 건축물에 사용한 이렇다 할 실적이 없으나 근래에 포스트텐션 공법용으로 국민투자신탁 건물, 한국신용유통사옥에 300kg/cm² 정도의 콘크리트를 사용하였으며, 앞으로 분당지역에 30층의 고층아파트에는 이들의 사용이 필수적으로 보여진다.

3.2 토목구조물에서의 고강도 콘크리트

고강도 콘크리트의 토목구조물에서의 응용은 주로 보의 깊이를 줄이거나, 마모에 대한 저항을 줄이기 위하여 교량에 주로 사용되어 왔으며 차츰 원자력발전소, 지하구조물 등에도 그의 이용범위가 넓혀져 가고 있다. 주요 지역별 사용현황은 다음과 같다.

표 1. 고강도 콘크리트를 사용한 교량

Bridge	Location	Year	Maximum span ft m		Maximum design strength	
					lbf/in ²	MPa
Willows Bridge	Toronto	1967	158	48	6000	41
Houston Ship Canal	Texas	1981	750	229	6000	41
San Diego to Coronado	California	1969	140	43	6000L*	41L*
Linn Cove Viaduct	North Carolina	1979	180	55	6000	41
Pasco-Kennewick	Washington	1978	981	299	6000	41
Coweman River Bridges	Washington		146	45	7000	48
Huntington to Proctorville	W. Va. to Ohio	1984	900	274	8000	55
Annacis	British Columbia	1986	1526	465	8000	55
Tower Road	Washington		161	49	9000	62

* Lightweight concrete

3.2.1 해외 현황

(1) 북미지역-이 지역에서의 고강도 콘크리트는 주로 교량에 사용되어 왔으며 <표 2> 이들은 주로 장스팬의 교량(30~230m)에서 이전의 이점과 더불어 자중을 줄일 목적으로 사용되고 있다. 또한 Creep변형의 감소는 프리스트레스 상실을 줄여주기 때문에 P.S.부재에 많이 응용되고 있다. 근래에는 내구성 증진 등의 효과때문에 해양구조물 등 특수구조물에서의 응용이 넓혀지고 있다.

2) 유럽 및 일본지역-토목구조물의 고강도 콘크리트의 응용은 유럽 및 일본에서 시공성의 개선을 목적으로 미주지역보다 비교적 일찍 1960년대부터 이용되어 왔으며, 근래에는 미주지역과 마찬가지로 장스팬교량의 보, 프리스트레스 슬래브 상판에 고강도의 목적으로 이용되고 있으며, 포장 코오리트에 2일 강도를

210~280kg/cm²되게 하여 1~2일내에 통행이 가능하도록 하고 있다.

3.2.2 국내 현황

국내에서는 1980년대 후반기부터 비교적 활발히 진행되고 있는데 이는 400kg/cm²를 사용한 88올림픽 대교, 노량대교, 팔당대교, 올림픽수영장 등 20여건에 이르고 있으며 이들은 대부분 슬래브 상판에 이용되고 있다. 이밖에도 원광 원자력발전소에도 400~450kg/cm² 정도의 강도를 사용하고 있으나 아직 P.S.구조물이 아닌 구조물에서의 이용상황은 이렇다 할 보고가 없는 실정이다.

4. 맺음말

지금까지 서술한 바와 같이 고강도 콘크리트

트는 콘크리트의 등장이후 지속적인 염원에 부응된 것이고, 우수한 특성을 갖고 있지만 아직 일부 선진 외국에서만 이용되고 있거나, 혹은 이용되고 있다하더라도 아직 지진등과 같은 충격적 횡력에 약한 연성 등의 확보가 중요한 문제로 남아있다. 또한 이러한 고강도를 살리기 위하여 이에 상당하는 고강도 보강근에 대한 연구도 미진한 실정이다.

근래에 와서 세계적으로 고성능 감수제의 개발로 고강도 콘크리트에 관한 Symposium이 많이 개최되고 있으며 그의 실용화가 집중적으로 거론되고 있는 실정이다. 이와 같은 급변하는 현실에서 국내에서도 새로운 기능을 갖고 있는 고강도 콘크리트에 대한 물리적이거나

나 심리적 한계를 극복하여 비교적 효율도가 큰 아파트나 고층 건축물 및 토목구조물의 응용이 시급히 이루어져야겠다.

참 고 문 헌

- 1) ACI-363, "State of the Art Report on High-Strength Concrete.", ACI 363 R-84, Journal of ACI, July/Aug., 1984.
- 2) Godfrey, K.A., "Concrete Strength Record Jump 36%", Civil Engineering, 1987, 10.
- 3) 건설부 "건축공사 표준시방서", 대한건축학회, 1985.